

MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

## **MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS GENERADOS POR LOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA**

### **INTEGRAL WASTE MANAGEMENT GENERATED BY SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS IN COLOMBIA**

**JHON FEDDY CHAPARRO PÉREZ**

Ingeniero Ambiental, Ingeniero Ambiental Meyan S.A, Bogotá, Colombia  
u2700915@unimilitar.edu.co Jhonch1989@gmail.com

#### **Trabajo de grado**

Para optar el título de especialista en:

Planeación Ambiental Y Manejo Integral De Recursos Naturales

#### **DIRECTOR**

**Ph.D. Ximena Lucía Pedraza Nájjar**

Doctora en Administración – Universidad de Celaya (México)

Magíster en Calidad y Gestión Integral – Universidad Santo Tomás e Icontec

Especialista en gestión de la producción, la calidad y la tecnología - Universidad Politécnica de Madrid (España)

Especialista en gerencia de procesos, calidad e innovación – Universidad EAN (Bogotá D.C.)

Microbióloga Industrial – Pontificia Universidad Javeriana

Auditora de certificación: sistemas de gestión y de producto

Gestora de Especialización en Gerencia de la Calidad - Universidad Militar Nueva Granada

ximena.pedraza@unimilitar.edu.co; gerencia.calidad@unimilitar.edu.co



**ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO DE RECURSOS  
NATURALES**

**FACULTAD DE POSGRADOS INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

**JUNIO DE 2019  
BOGOTÁ**

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS GENERADOS POR LOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA

### INTEGRAL WASTE MANAGEMENT GENERATED BY SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS IN COLOMBIA

**JHON FEDDY CHAPARRO PÉREZ**

Ingeniero Ambiental

u2700915@unimilitar.edu.co Jhonch1989@gmail.com

#### RESUMEN

La energía fotovoltaica al ser una fuente de energía renovable y de baja emisión de GEI, se ha establecido como una de las fuentes de mayor crecimiento e importancia a nivel mundial para la sustitución energética generada por los combustibles fósiles, y Colombia no ha sido la excepción a esta tendencia pues le ha abierto un espacio de degeneración en la matriz de generación energética del país partir de año 2014, sin embargo en los últimos años se ha encontrado que los elementos básicos para la obtención de esta energía “los paneles solares” generan en la parte final de su ciclo de vida una gran cantidad de residuos sólidos que dado sus características y componentes se pueden llegar a considerar como residuos peligrosos o de gran potencial de toxicidad, y que al dárseles un mal manejo y disposición a éstos se pueda convertir en una problemática de gran escala generando problemas a la salud humana y a los ecosistemas. Es por eso que en este artículo se planteó una investigación de tipo documental y monográfica con base en escritos científicos e informes de entidades gubernamentales sobre los principales componentes de fabricación de los paneles solares más utilizados a nivel mundial, así como los residuos que generarían y el grado de toxicidad que puedan llegar a presentar por una mala disposición: encontrándose como resultado principal que si bien el mayor porcentaje de residuos es aprovechable hay una pequeña porción conformada por compuestos tóxicos que pueden llegar a diluir con agentes externos y generar algún tipo de lixiviados.

**Palabras clave:** Residuos Sólidos, Paneles Solares, RESPEL<sup>1</sup>, Posconsumo, Planificación ambiental, Celdas fotovoltaicas, Caracterización Residuos.

#### ABSTRACT

Photovoltaic energy, as a source of renewable energy and low GHG emissions, has established itself as one of the most important sources of growth and importance worldwide for the energetic substitution generated by fossil fuels, and Colombia has not been the exception. This trend has opened up a space for degeneration in the generation matrix of the country since 2014, however in recent years it has been found that the basic elements for obtaining this energy "solar panels" generate in the final part of its life cycle a large amount of solid waste that given its characteristics and components can be considered as hazardous waste or of great potential for ecotoxicity, and that being given a bad management and disposal to these can become a problem

---

<sup>1</sup> RESPEL: Residuos Peligrosos

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

of large scale generating problems to human health and ecosystems. That is why in this article a documentary and monographic research based on scientific writings and reports from government entities on the main manufacturing components of the most used solar panels worldwide, as well as the waste they would generate and the degree of toxicity that may come from a bad disposition: finding as a main result that although the highest percentage of waste is usable there is a small portion formed by toxic compounds that can be diluted with external agents and generate some type of leachate.

**Keywords:** Solid Waste, Solar Panels, RESPEL, Post-consumption, Environmental planning, Photovoltaic cells, Residual characterization.

## INTRODUCCIÓN

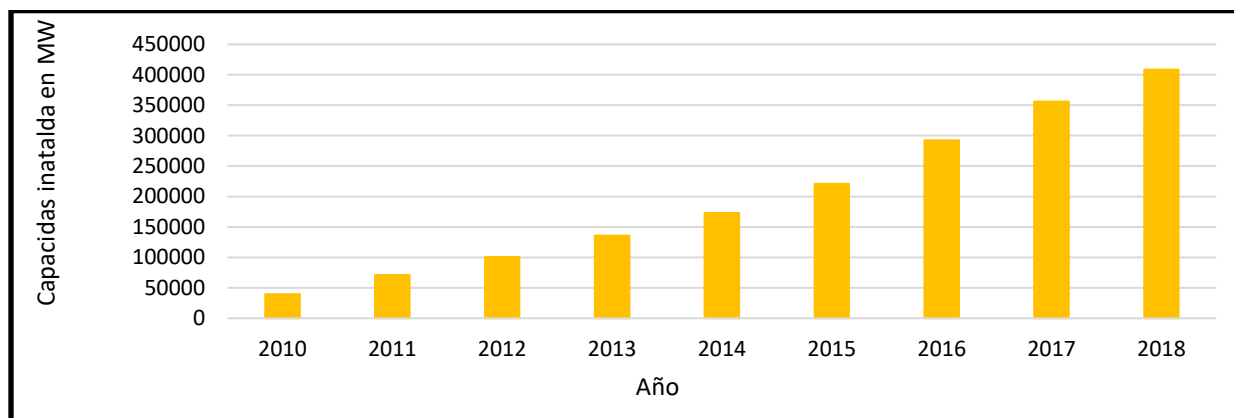
A medida que aumenta la población humana y el desarrollo industrial a nivel mundial también ha aumentado la demanda energética para suplir las necesidades humanas e industriales, las cuales se han tratado de soportar con los combustibles fósiles hasta ahora descubiertos, sin embargo en las últimas décadas se ha empezado a evidenciar el gran impacto negativo que generan el usos de los combustibles fósiles hacia los ecosistemas naturales, su contribución a la generación de gases del efecto invernadero y su relación con el cambio climático (International Renewable Energy Agency, 2019) (Berrio & Zuluaga, 2014).

Por lo cual el mundo científico e industrial ha venido buscado nuevas fuentes de transformación de energía para poder cubrir las necesidades de consumo de energía eléctrica, que con lleven un menor impacto al medio ambiente; una de estas nuevas fuentes es la energía solar fotovoltaica la cual se basa en la captación de la radiación solar y su posterior transformación y aprovechamiento a la energía eléctrica, mediante la construcción de celdas fotovoltaicas que agrupadas en una estructura forman los paneles solares (Berrio & Zuluaga, 2014). Dicha fuente de energía se caracteriza por ser renovable, de bajo impacto ambiental, poca emisión de CO<sub>2</sub> y de gran potencial de generación en múltiples países, características que le han permitido un gran desarrollo a tal punto que hoy en día se ha convertido en la segunda fuente de energía renovables con mayor desarrollo, inversión e instalación a nivel mundial, y que a con la reducción de sus

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

costos de producción e instalación ha podido incrementar su uso en la última década como se evidencia en la Grafica 1. (International Renewable Energy Agency, 2019).

Gráfica 1: *Capacidad Instalada de energía Solar Fotovoltaica a nivel mundial*



Gráfica 1: *Incremento de la capacidad instalada en MW en la última década. Adaptado de International Renewable Energy Agency, 2019*

Dado esas características de la energía fotovoltaica ya muchos países han decidido incluirla en sus sistemas y matrices de generación de energía eléctrica como es el caso de China, Japón, Estados Unidos, Australia, Alemania y España (International Renewable Energy Agency, 2019). Lo que ha llevado a que países en desarrollo como Colombia empiecen a tener una gran expectativa y acogida de aplicación en los últimos años, dado el gran potencial de radiación solar que recibe el país durante la gran parte del año al estar ubicado en el radio ecuatorial (Berrío & Zuluaga, 2014), llegándose a presentar como fuentes de energías alternativa para zonas rurales, municipales y para zonas urbanas a pequeñas escalas en edificaciones con certificación LEED o de carácter individual como casas y apartamentos (Gómez, Murcia, & Cabeza, 2017). Situación ratificada y promovida por el gobierno nacional a través de la inclusión en la matriz energética del país como una de las nuevas fuentes de energías renovables y no convencionales con mayor eficiencia y potencial de desarrollo energético en el territorio nacional a través de la Ley 1715 de 2014 (Congreso de la República de Colombia, 2014).

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

Lo que nos con lleva a que a medida que se empieza a desarrollar cada vez más esta forma de obtención de energía tanto en Colombia como a nivel mundial se requirieran millones de unidades de paneles solares fotovoltaicos para poder cubrir la demanda, sin embrago los paneles solares fotovoltaicos tienen dos grandes inconvenientes: el primero es que su uso de vida útil no sobrepasa los 20 años y el segundo es que están fabricados y ensamblados de materiales que están compuestos por metales pesados, tierras raras y algunos agentes corrosivos que al exponerse con medio ambiente y con el paso de los años una vez finalizado su ciclo de vida, tienden a degradarse y reaccionar con el aire y la humedad generando la aparición de lixiviados y sustancias corrosivas lo que llevaría al residuos a contemplarse como un residuos de carácter peligros (Ramírez Agudelo, 2018) (Parvez, Candace, Nazmut, & Shahjadi, 2018).

Lo que ha llevado a realizar estudios acerca del análisis de ciclo de vida de esta fuente de energía y sus distintos componentes incluidos los paneles solares, acerca de la producción limpia y la reducción de huellas de carbón, donde se evidencia los impactos ambientales que se tendrían a futuro en la etapas de desmontaje y destrucción de los paneles solares fotovoltaicos podrían presentar un grado de alteración y contaminación a los ecosistemas (Lagunesa, Ardente, Blengini, & Mancin, 2016) (Parvez, Candace, Nazmut, & Shahjadi, 2018). lo que llevaría a que un mal manejo de estos residuos de características potencialmente peligrosos podría generar una gran catástrofe sobre los ecosistemas naturales y sobre las asentamientos humanos, generando perdidas y alteraciones de ecosistemas y propagación de enfermedades o alteraciones a la salud humana, generándose un problema de desde ya en el tema de planeación de ambiental enfocada al manejo de residuos sólidos y peligrosos (Parvez, Candace, Nazmut, & Shahjadi, 2018).

Por lo cual el número de unidades de paneles solares desechadas una vez se terminen su ciclo de vida en un par de años, convertirá a estos aparatos en una fuente importante de generación de residuos sólidos que en algunos casos serán de potencial peligroso. (Fiandra,

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

Sannino, Andreozzi, Corcellib, & Graditi, 2019) (Ramírez, 2018) (Latunussa, Ardente, Blengini, & Mancin, 2016).

Es por eso que en este artículo plateamos realizar un manejo integral de los residuos sólidos generados al final del ciclo de vida de los paneles solares fotovoltaico en Colombia, y evitar futuros desastres ambientales, como ya los tuvimos por varios años con la mala disposición de residuos generados por las bombillas eléctricas, llantas de caucho, pesticidas y otros productos industriales que generaron gran problemáticas al final de la útil sobre nuestros ecosistemas y sobre algunas poblaciones.

Esto a través de una identificación de los paneles solares de tipo fotovoltaicos más utilizados a nivel industrial y con mayor demanda para las plantas solares, así como una identificación de los materiales de fabricación de los mismos y una caracterización de los residuos que se generaren una vez se termine el ciclo de vida de los paneles solares de tipo fotovoltaico y su potencial de peligrosidad a nivel de salud y ambiente, para así documentar los métodos con mayor grado de eficiencia a nivel internacional hasta el momento probados con éxito para la disposición de estos residuos, y poder así al final mirar y analizar el cumplimiento, funcionalidad y retos a futuros a nivel de legislación en Colombia a través de sus políticas y normas vigentes respecto a estos desechos industriales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para desarrollar la presente investigación se escogerá una metodología de revisión bibliográfica o monográfica estableciendo una investigación de carácter cualitativo basada en artículos académicos y científicos publicados en revistas reconocidas en el medio de investigación a nivel internacional y artículos de proyectos de grado de tesis para optar distintos tipos de niveles académicos, así como una consulta de datos y cifras en organizaciones

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

internacionales y nacionales avaladas por convenios y tratados que tiene el gobierno de Colombia con otros países y organizaciones.

Para la selección de dichos artículos académicos y científicos se establecerán como fecha de publicación del año 2014 hacia adelante para darle un mayor grado de actualidad al estudio, se filtrarán en primero lugar a los que enmarquen el ciclo de vida de carácter de la “Cuna a la tumba” el cual nos dará una recopilación de la caracterización de los residuos que se generan al final de la vida útil de los paneles solares fotovoltaicos y cuales tienen características de residuos peligrosos.

Posterior a estos se realizará una segunda filtración y se escogerán los artículos científicos cuya coincidencia este más relacionada a la caracterización, manejo y métodos de disposición de alguno de los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares fotovoltaicos y de cuales ya hayan pasado de alguna prueba experimental y cuyo resultado sea satisfactorio en cuanto a las normas ambientales.

Por último, se escogerán las políticas nacionales que tiene el gobierno colombiano en cuanto al manejo de los RESPEL y los RAEE, en las cuales se analizarán como esta referenciada la normatividad hacia estos residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares y así poder establecer las debilidades, fortalezas y proyecciones al futuro para el manejo integral de los mismos, de igual forma se analizarán las licencias ambientales que se adjudicaron para los primeros parques y su relación con las disposición de Respel y los paneles solares Fotovoltaicos.

En relación con los materiales a utilizar en la presente investigación se tiene las bases de datos con que cuenta la universidad Militar Nueva Granada, además de la universidad Manuela Beltrán y las bases de carácter científico y libre acceso, así como libros que puedan estar en estas bibliotecas o en la red de bibliotecas de la ciudad de Bogotá y la biblioteca nacional de Colombia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **Paneles solar fotovoltaicos: los más utilizados, sus componentes de fabricación y residuos generados al final de la vida útil**

En el mercado mundial se tiene varios tipos de paneles solares de carácter fotovoltaico por lo cual los componentes con los que se fabrican pueden variar de un prototipo a otro, desde un compuesto en particular hasta la cantidad del mismo, lo que hace que la caracterización y las cantidades de los residuos potencialmente peligrosos puedan variar de un modelo a otro, así como los métodos y costos de tratamiento; (Fiandra, Sannino, Andreozzi, Corcellib, & Graditi, 2019) no obstante en la actualidad hay modelo de panel solar que se tiende ocupar la mayor cantidad del mercado global a nivel de instalación tanto en los grandes plantas fotovoltaicas de generación como en las pequeñas unidades, dicho modelo es el silicio cristalino conocido bajo las sigla en inglés (C-SI PV) y denominado de primera generación por ser uno de los primeros modelos en desarrollarse, estos tienen la particularidad de ser los que mayor grado de eficiencia energética capturada y aprovechada, lo que lo convierte que a fechas del año 2014 tenga una porcentaje en el mercado mundial del 92% en cuanto a los modelos de paneles instalados y que para los años entre 2020 y 2030, siga siendo el líder de los modelos utilizados a pesar de una notorio descenso de participación en el mercado global, dado la nueva generación de modelos más económicos aunque menos eficientes y perdurables. (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016).

El otro modelo de gran relevancia tanto por su participación en el mercado global en la actualidad como su proyección a futuro son los de paneles de película delgada, los cuales poseen una tecnología más compleja que los hechos a base de silicona, y tiene un porcentaje de participación en el mercado al año 2014 del 8% y una proyección hacia los años 2020 y 2030 del



## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

10 y 11% lo que significa una buena participación en el mercado global. (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016). En cuanto a los paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino tiene por características estar fabricados a base de cristalina del silicio, y una conformación de un cristal continuo denominado monocristalino o varias cristales de silicio formando los policristalino, donde este último es tiene a nivel mundial el 85% del mercado mundial instalado, pues es que posee el de mayor grado de eficiencia y el de mayor rentabilidad dado el costo beneficio a lo largo de los años de uso (Bonilla, 2016).

En cuanto a los materiales utilizados en los paneles solares de silicio policristalino se pueden encontrar una gran variedad de compuestos químicos dependiendo de las seis capas en que se divide, pues cada uno presta una función distinta y requiere un material diferente, sin embargo, los más relevantes por capa se muestra en la tabla 1. En cuanto porcentaje de peso por cada compuesto se evidencia que generalmente está relacionado de la siguiente forma: un 76% de vidrio, un 10% de polímero, un 8% de aluminio, un 5% de silicio, un 1% de cobre y 1% plata y otros metales como plomo y estaño (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016).

En cuanto a los paneles solares fotovoltaicos de películas delgadas o como se conocen en inglés “Thin-film panels” tiene una estructura más compleja que los fabricados a base de Silicio, la cual se basa en una estructura en capas delgadas de material semiconductor almacenadas en bases de vidrio, polímeros o láminas de metal; sin embargo, estos paneles solares pueden dividirse en dos categorías principales, CIGS y CdTe. Los primeros los CIGS o células solares de seleniuro de galio se basan en la utilización de metales como Cobre, Indio, Galio, Selenio y Zinc para servir de semiconductores sobre placas de vidrio o polímeros; Estos están conformados

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

por una capa de células que están depositadas sobre un contacto posterior metálico hecho de aleaciones y este está sobre una capa de vidrio, de igual forma utilizan capas delgadas de sulfuro de cadmio o también óxido de zinc; en la capa de la superficie se usa una capa de capa de vidrio, en cuanto al porcentaje de composición de materiales en los paneles GIGS se tiene que en 88% es de Vidrio (porcentaje que tiende en un futuro a bajar), 7% de Aluminio, 4% de Polímeros y 1% metales semiconductores, el cual tiende a subir en los diseños a futuro y que de una manera más detallada corresponde al 10% de cobre, 28% de indio, 10% de galio y 52% de selenio (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016).

Tabal 1:  
*Materiales que componen los paneles solares de silicio policristalino según su capa de estructura*

No Capa	Nombre de la capa	Materiales de composición	Componentes químicos
1	Vidrio protector	Fabricada de vidrio templado sosa	Sodio Cal Sílice Hierro
2	El encapsulante	Conformado con el polímero de Etil-Vinil-Acetato (EVA)	Etileno Acetato de vinilo
3	Celdas solares e interconexiones metálicas	Están hechas de cintas metálicas	Silicio Plata Aluminio Plomo Estaño
4	Cubierta posterior	Subcapa 1: polivinilo fluoruro (TEDLAR) Subcapa 2: Tereftalato de Polietileno (Poliéster) Subcapa 3: polivinilo fluoruro TEDLAR	Polivinilo fluoruro Tereftalato de Polietileno
5	Marco	Está fabricado de aluminio anodizado	Aluminio
6	Cubierta posterior final	Se fabrica con el polímero Polifenilen éter	

*Nota: Descripción de las capas que conforman un panel solar de tipo policristalino y sus distintos materiales de conformación adaptado de (Bonilla, 2016).*

En relación con los paneles solares de tipo CdTe se caracterizan por ser una de las tecnologías más prometedoras a corto plazo pues pueden alcanzar una gran eficiencia de aprovechamiento y una reducción de costos en comparación a los de silicio policristalino (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

Agency Photovoltaic Power Systems, 2016); dichos paneles de CdTe están fabricados básicamente de compuestos inorgánicos a base de cadmio generalmente mezclado con azufre formando Sulfuro de cadmio (CdS) y con Telurio constituyendo telurio de cadmio (CdTe) como componentes captadores, convertidores y semiconductores los cuales se instalan en pequeñas películas intercaladas una de la otra, para luego ser soportadas en la parte de abajo sobre contactos de placas metálicas de aluminio y en la parte de arriba cubiertas por un vidrio como soporte protector y por ultimo protegido por marco metálico generalmente de aluminio (Valadez, De La Torre, Esparza, & Rivas, 2017). En cuanto a la relación de porcentaje por peso por cada componente ésta no se pudo establecer dentro de la literatura encontrada. Dado lo anteriormente reportado tenemos que para los paneles solares de tipo películas delgadas se tienen que los principales materiales de fabricación son los mostrados en la tabla 2.

Tabal 2:  
*Materiales que componen los paneles solares de películas delgadas según su capa de estructura*

No Capa	Nombre de la capa	Materiales de composición	Componentes químicos
1	Vidrio protector	Fabricada de vidrio templado sosa	Sodio Cal Sílice Hierro
2	El encapsulante	Conformado con el polímero de Etil-Vinil-Acetato (EVA)	Etileno Acetato de vinilo
3	Celdas solares e interconexiones metálicas	Están hechas de cintas metálicas	Selenio Galio Indio Plata Cadmio Telurio
4	Cubierta posterior	Láminas de aluminio	Aluminio
5	Marco	Está fabricado de aluminio anodizado	Aluminio

*Nota: Descripción de las capas que conforman un panel solar de tipo películas delgadas (CIGS y CdTe) y sus distintos materiales de conformación adaptado de (Bonilla, 2016).*

Una vez se establecieron los principales compontes que conforman los paneles solar más usados en la actualidad se procedió a documentar cuáles serían los residuos generados una vez se culminara el ciclo de vida útil de estos elementos, donde se encuentra que los paneles solares

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

generan residuos sólidos en su totalidad y que en el caso de los del tipo Silicio policristalino están representados en un 96% de vidrio, polímeros y las láminas de aluminio, y el 4% restante corresponde a los otros componentes tales como sílice, plata y trazas de elementos como el estaño, zinc y el plomo.

Situación que cambia un poco con relación a los paneles de tipo de películas delgadas pues sus residuos generados corresponden un 98% a vidrios, polímeros y láminas de aluminio y un 2% a otros materiales conformados por metales como Cadmio, Telurio, Cobre, Zinc indio, galio, selenio, telurio de cadmio y plomo, porcentajes que conciden con los utilizados para su fabricación inicial. (Bonilla, 2016) (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016) (Ramírez, 2018)

### **Clasificación de los residuos y su potencial de toxicidad y ecotoxicidad**

En cuanto a la clasificación de los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares nos centramos en tres tipos: la clasificación denominada “aprovechamiento de valor” la cual se fundamenta en la incorporación de los residuos una vez generado ya sea de manera de reciclaje, reutilización, reincorporación y eliminación; en cuanto a la otra clasificación de residuos escogida es la estipulada en el convenio de Basilea, la cual se basa en su potencialidad de peligrosidad al ambiente: estableciéndolos en desechos inertes, desechos no peligrosos y desechos peligrosos. La tercera es según el aspecto origen especial del residuo. Lo que nos permitió determinar cuáles son los residuos que no se pueden incorporar de una manera tan rápida nuevamente al mercado y cuales de estos poseen un mayor potencial de peligrosidad y toxicidad a los seres humanos y al medio ambiente como tal. (Parvez, Candace, Nazmut, & Shahjadi, 2018)

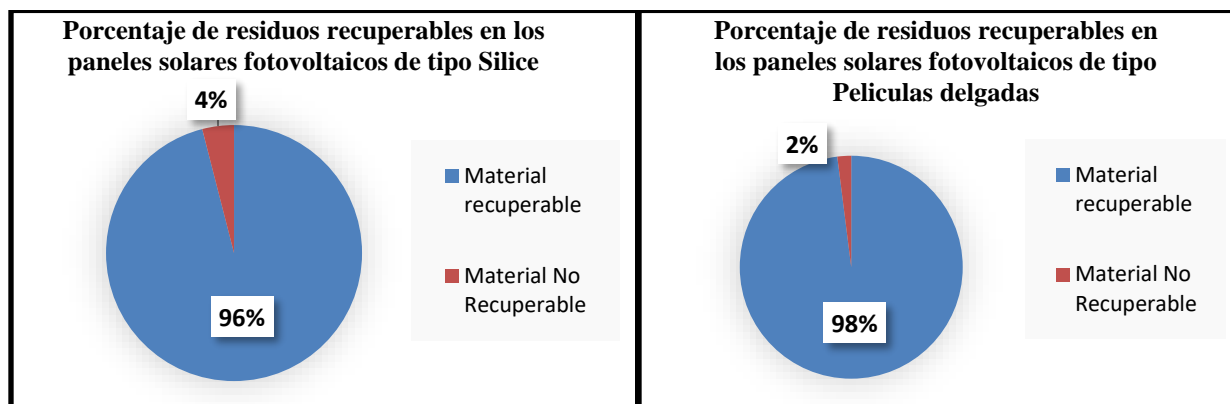
## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

En cuanto a la primera clasificación se establece que los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares tanto los de silicio policristalinos y los de películas delgadas corresponden a un material con gran potencial de reciclaje y reutilización pues los componentes de vidrio sosa, los polímeros basados en Etil-Vinil-Acetato (EVA), las placas de aluminio de los marcos y laminas de soportes tienen bastantes salidas a nuevos mercados; y pues su desintegración y separación de los paneles solares resulta ser una operación sencilla, rápida y muy limpia si se tiene en cuenta que prácticamente salen de manera puros y con poca alteración con los otros componentes. (Parvez, Candace, Nazmut, & Shahjadi, 2018) (Bonilla, 2016). Y que dicho porcentaje en relación con la masa y al volumen de los residuos generados por los paneles solares esta por encima del 90% en ambos tipos de paneles solares. (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016).

Sin embargo los componentes utilizados en la fabricación de celdas solares fotovoltaicas y conductores se mezclan de algunos metales y cuyo porcentaje están entre el 4% para los paneles de sílice y del 2% para los de películas delgadas presentan un potencial de poco reciclaje o reincorporación a otras industrias pues para su separación requieren de grandes cantidades de energía y de un tratamiento especial dado la características fisicoquímicas de cada uno de estos metales seleccionados en su fabricación. Valores que se aprecian en la gráfica 2 y que determinan que en su mayoría los volúmenes de recuperación de material del residuo generado por parte de los paneles solares fotovoltaicos es recuperado y aprovechado nuevamente para la incorporación de procesos industriales y que una cantidad muy pequeña queda como residuo (Bonilla, 2016) (Fiandra, Sannino, Andreozzi, Corcellib, & Graditi, 2019) (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016).

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

Gráfica 2: Porcentajes de material recuperado de los residuos generados en cada uno de los tipos de paneles



Nota: Se muestran los porcentajes de recuperación de residuos generados y el porcentaje no recuperado en cada uno de los tipos de paneles fotovoltaicos. Adaptado de IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016

En relación con la clasificación basada en su peligrosidad se encuentra que los residuos como el vidrio, los polímeros y las estructuras del marco (aluminio) que se tienen como potencialmente reciclajes o reutilizables no presentan mayor peligrosidad tanto para los humanos como al medio ambiente, sin embargo paso lo contrario con los residuos de las celdas y los conductores pues estos si presentan un grado de peligrosidad al estar compuestos de metales pesados tales como el plomo, el cadmio los cuales al estar al contacto con el agua pueden llegar a generar lixiviados cargados de estos elementos alternado así los ecosistemas. (Bonilla, 2016) (Fiandra, Sannino, Andreozzi, Corcellib, & Graditi, 2019) (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016). Y es que en el caso específico del Silicio que es uno de los componentes esenciales de los paneles solares de tipo silicio policristalino si bien no se disuelve tan rápido con el agua para formar lixiviados de algún tipo, si tiene un efecto de toxicidad bajo al quedar expuesto tanto tiempo al aire libre pues puede llegar a contribuir a la generación de material particulado de alguna zona. (Bonilla, 2016) (Berrio & Zuluaga, 2014). (Fiandra, Sannino, Andreozzi, Corcellib, & Graditi, 2019)

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

Respecto al plomo el cuales uno de los componentes de los paneles solares de tipo silicio policristalino se tiene que éste elemento si altamente toxico, pues se puede liberar al medio ambiente al disolverse con algunos ácidos generando lixiviados que pueden llegar a presentar alteraciones en los suelos y cuerpos de aguas y que al ser ingerido por los humanos y animales les puede llegar alterar los sistemas nervioso, respiratorio y cardiaco que dependiendo de la dosis puede llegar a causar la muerte. (Bonilla, 2016). (Berrio & Zuluaga, 2014) (Fiandra, Sannino, Andreozzi, Corcellib, & Graditi, 2019)

Con relación al cadmio presente en los paneles solares de tipo películas delgadas se caracteriza por ser un metal pesado, y uno de los elementos cancerígenos en los humanos y en los animales donde con concentraciones de 50 mg en tiempo de una hora en los humanos se han reportado casos fatales, el cual al contacto con agentes corrosivos o ácidos tiende a formar lixiviados. (World Health Organization, 1999). (Centro Nacional de Energías Renovables, 2013) (Centro Nacional de Energías Renovables, 2013) (Tammaro, Rimauro, Fiandra, & Antonio, 2015)

En cuanto a la clasificación relacionada al aspecto origen especial se encuentra que están clasificados entre los componentes como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos RAEE la cual se basa al que al ser los paneles solares constituidos con componentes electrónico deben ser manejados con unas características específicas para su grupo (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016).

### **Métodos de disposición de residuos**

A nivel mundial se tienen que para la disposición de los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares ya se han establecido varias técnicas las cuales las más

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

desarrolladas se dan en países como Alemania, España, Estado unidos y Japón y cuyos métodos de disposición se basan en depositarlos en celdas de seguridad como residuos especiales, o hacerles un proceso de recuperación y reciclaje de materiales los cuales se basan en procesos de separación manual, mecánica, magnética y procesos de trituración e incineración a grandes temperaturas y para los componentes de carácter peligrosos se realiza un proceso de lixiviación tipo ácido seguido de una electrolisis como paso final del proceso de prefiltros (Bonilla, 2016). (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016). (Bonilla, 2016).

Ya casos más específicos se dan como el centro Energy Research Center from Netherlands (ECN) plantea método de reciclaje basados en la remoción manual del marco y la caja de conductores, para luego pasar el módulo sin marco un molino de trituración, donde separar en fragmentos de vidrio limpio y material de tabulación, donde se hace ya una nueva separación de vidrio, y de fragmentos de celdas solares que serán vendidos como elementos de baja calidad. (Bonilla, 2016).

Otro de los procesos de disposición de residuos con fines de aprovechamiento es hacer una separación manual o mecánica de los que es el marco y las conexiones eléctricas y pasar el residuo sobre hornos a 150°C para la separación de vidrio de las celdas y las capas de polímeros, y así poder recuperar la mayor cantidad de vidrio, luego se hacen procesos de pirolisis y gasificación sobre las capas de polímeros generando gases, aceites (usados posteriormente como combustibles) y cenizas a las cuales se les hacen después un proceso de lixiviación ácida a altas temperaturas y un proceso de electrolisis y preletrado con el fin de hacer una separación del silicio cristalino y los demás iones metálicos y contaminantes que puedan surgir. (Bonilla, 2016).



## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

### **Normatividad de disposición final de paneles solares fotovoltaicos a nivel mundial**

A nivel mundial se tiene que la normatividad se basa en la implementación de programas posconsumo que involucren los productores, comercializadores y consumidores de tal forma que se puedan establecer una participación de todos los integrantes del ciclo de vida de los paneles solares fotovoltaicos, donde en dichos programas se plantea en una disposición de residuos de carácter especial dado su origen y su variación de compuestos, la cual esta demarcada como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos RAEE, donde lo que se busca que estos residuos sólidos se les dé un manejo distinto al que normalmente se les da a los residuos sólido convencionales, y así evitar que lleguen a los rellenos sanitarios y plantas de aprovechamiento donde se podrían mezclar con residuos orgánicos, e inorgánicos lo que generaría un aumento en el potencial toxicológico de los residuos. (Ramírez, 2018) (Bonilla, 2016) (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016).

Esta disposición de paneles solares fotovoltaicos se tiene en muchos países ya como parte de la disposición de RAEE a partir de los conceptos de desarrollo sostenible y del manejo del ciclo de vida, sin embargo el liderazgo por una buena gestión de residuos más allá de un trato especial de separación y disposición en celdas especiales de almacenamiento esta dada por los países de la Unión Europea, quienes plantean que se debe lograr una línea de reciclaje, recuperación y reincorporación de las materiales primas basadas en un indicadores y metas a partir de las unidades fabricadas y comercializadas cuya estrategia de disposición está promovida por sus fabricantes. En relación a países como Estados Unidos si bien también se maneja como un residuo RAEE se tiene como denominado como residuo con potencial peligroso dado sus componentes, sin embargo se da que por iniciativa de los mismos fabricantes se plantea plantas de aprovechamiento y recuperación de materiales bajo estándares de protección y manejo

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

ambiental para residuos potencialmente peligrosos; y por último en casos como Japón y China , donde el consumo de paneles es muy alto se empiezan a plantear e investigar programas de reciclaje a bajo costo. (Ramírez, 2018) (Bonilla, 2016) (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016).

### **Normatividad sobre disposición final de paneles solares fotovoltaicos en Colombia**

En el caso de Colombia se tiene que a partir de la firma de los convenios internacionales de planteados en Rio de Janeiro de 1992 y de 2012 y la cumbre de Basilea en el año de 1989 y de la posterior conformación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo a través de la ley 9 de 1993 se ha establecido algunos mecanismos que lleven a la planeación ambiental y el manejo integral de los residuos generados en Colombia, iniciando con lo establecido en el decreto 1713 de 2002 donde se plantea la definición de lo que es un residuo y su clases de clasificación de acuerdo a las características de éste (Ramírez, 2018), de igual forma se tienen políticas enfocadas al tema de residuos, como lo son la Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos RESPEL donde se reglamenta con lo expuesto en el decreto 4741 de 2005 para el manejo de residuos sólidos de carácter peligroso, de igual manera se cuenta con la Política de Gestión integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE del 2007, las cuales se ratifican con su inclusión en el decreto 1076 de 2015 conocido como el Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible y su complementación con el decreto 284 del 2018 del ministerio de ambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. Gobierno Nacional de Colombia, 2019). (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, 2018) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. Gobierno Nacional de Colombia, 2019) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, 2017)

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

Sin embargo dicha normatividad se queda algo corta para los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares dado que si bien los contempla por su clasificación de aparatos electrónicos dentro de la política RAEE esta no los nombra específicamente, por lo cual su disposición final no se lleva del todo como está estipulada, pues aún se siguen presentando problemáticas asociadas a la mala disposición de éstos por parte de los consumidores, productores, comercializadores y centros de recuperación y disposición (gestores) terminado estos residuos en rellenos sanitarios mezclados en muchas ocasiones con residuos domésticos, generando problemas con lixiviados lo que conlleva a una afectación de las poblaciones y ecosistemas especialmente a la parte de fuentes hídricas. (Ramírez, 2018). (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2016).

De igual forma se ha podido evidenciar que a partir de la apertura de la matriz energética del país y de la incorporación de la energía fotovoltaica en la misma en el año 2014, se dispuso por parte de la autoridades ambientales que para estos proyectos de gran generación de energía se tenga que solicitar permisos y estudios ambientales fundamentados bajo los parámetros de las licencias ambientales, los cuales serán evaluados y expedido por parte de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales ANLA y en donde se les solicitara entre otras cosas estudio de impactos ambientales bajo los términos de referencia ya establecidos por el ANLA, en donde a la fecha ya se han expedido y aprobo dos grandes plantas ubicadas en la parte del valle del cauca, el magdalena medio estas dos ya en funcionamiento y una tercera en la parte de la guajira próxima a construir. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. Gobierno Nacional de Colombia, 2019).

De igual forma se ha visto que partir de la misma también se ha empezado a implementar la energía fotovoltaica en proyectos para sistemas de transportes públicos como es el caso de los buses eléctricos en Medellín y el sistema de transporte tipo teleférico en la ciudad de Bogotá

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

(trasmicable) y en proyectos de carácter privado a nivel industrial como lo son las plantas de productos Ramo en Antioquia, los centros mayoristas de la empresa Makro y centros educativos como la universidad. Todo esto impulsado con las políticas estatales del gobierno del presidente Duque donde a través de elementos como el plan de desarrollo nacional (PDN) que uno de sus ejes transversales se promueve el uso de energías renovables, procesos de carbón cero y ciclos de vida circulares en las industrias colombianas; y promoción de otros mecanismos como la Estrategia Nacional de Economía Circular, donde promueve el uso de energías renovables un desarrollo comercial, ambiental y social del país (Gobierno de Colombia, 2018) (Ramírez, 2018).

## CONCLUSIONES

De acuerdo los resultados obtenidos en la presente investigación podemos concluir que los residuos de paneles solares a nivel mundial y en Colombia provienen en su mayoría de los modelos de tipo silicio policristalino y los de tipo de películas delgadas dado que son los modelos de mayor comercialización a nivel mundial, los cuales se catalogan a nivel mundial como residuos de manejo especial de tipo RAE, los cuales tienen un porcentaje superior al 90% de recuperación y reutilización en nuevos procesos industriales con respecto al volumen total de residuos generados, pues al estar compuestos de vidrios, polímeros y láminas de aluminio su procesos de separación y recuperación se hace de una manera más fácil, sin embargo el restante de residuos conformado por los laminas de semiconductores y las células fotovoltaicas se rescata un porcentaje el cual no resulta ser de alguna manera recuperable pues este se termina mezclando con elementos como el plomo y el cadmio los cuales tienen un grado de toxicidad alto, por lo tanto, en algunos países como Estados Unidos se les da un manejo de peligrosos, pues un mal manejo de estos residuos no aprovechables puede llegar a producir efectos colaterales, al exponerse con ácidos o con sustancias corrosivas terminarán generando algún tipo

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

de lixiviados que sin un adecuado tratamiento provocarían la contaminación de suelos y cuerpos de agua cercanos.

Sin embargo se encuentra que algunos países se tiene políticas de manejo integral de los residuos de los paneles solares fotovoltaicos donde el liderazgo a nivel mundial es la comunidad europea, pues en su política de RAEE para paneles solares se busca el máximo aprovechamiento para procesos de reciclaje, reintegración y recuperación a nivel industrial del material y dándole una pequeña porción la dominación de residuo no arrochele con destino de disposición en celdas de seguridad al porcentaje potencialmente peligrosos; y que en esta misma política se establecieron modelos de posconsumo estructurados del tal manera que involucra a todos los actores por los que pasan los paneles con el fin de garantizar la mayor cantidad de residuos dispuestos de manera correcta.

En cuanto a los procesos de recuperación y aprovechamiento del material se concluye que los sistemas de separación de residuos se basan en la separación manual y mecánica para las capas de marcos metálicos, las bases conformadas de polímeros y los dispositivos de cableado, seguida en la mayoría de casos por procesos térmicos para el manejo de las celdas fotovoltaicas las cuales buscan la recuperación de materiales como el sílice y otros metales, por último se realiza un proceso de pirolisis, gasificación y lixiviación para separar la mayor cantidad de contaminantes basados en cadmio y plomo.

En cuanto a la normatividad ambiental se concluye que si bien se tiene política de manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos esta queda corta al no mencionarse explícitamente su incorporación, de igual forma se establece que para la puesta en marcha de las grandes plantas de producción se establece la exigencia de licencias ambientales donde se le notifica al solicitante que realice un estudio de impacto ambiental donde se contemple acciones al manejo de residuos al final de la vida útil, acciones que se quedan cortas pues en Colombia

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

nos se tienen empresas gestora de residuos para el aprovechamiento de estos y que las celdas de disposición quedan algo cortas dado la cantidad de paneles que se tendrán en un par de años, por lo cual se debe establecer mecanismo a futuro para estos casos. De igual forma se hace evidente la falta de programas de posconsumo para esta serie de residuos como tal, lo que haría que su manejo adecuado sea mas eficiente para los pequeños usuarios.

## AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este trabajo y viendo los resultados agradezco infinitamente a todas esas personas que, con sus aportes académicos, de motivación y financieros contribuyeron para que pudiera desarrollar mi trabajo de grado y toda mi especialización, a mis compañeros y profesores de curso que con sus aportes de conocimiento y experiencia contribuyeron a finalizar este trabajo. De igual forma hago una mención especial a dos personas quienes siempre me han estado apoyando y motivándome desde antes de poder entrar a realizar mi especialización: Lucia Torres, a quien agradezco por su tiempo en lecturas, charlas y búsqueda de información y a la señorita Johana Agredo a quien agradezco profundamente por esa contrición en la búsqueda, recopilación y socialización de información, además su apoyo y motivación en cada una de las etapas de elaboración de este trabajo.

Por último, agradezco a mis padres Carlos Chaparro y Rosa Pérez y a mis dos hermanas Andrea Chaparro y Luisa Chaparro por apoyarme en esas horas de traspasos y fines de semana entre libros y computadores. ¡Muchas gracias!

**BIBLIOGRAFÍA**

- Berrio, L., & Zuluaga, C. (01 de Enero de 2014). Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida: una revisión en el contexto energético mundial. *Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte*, 32(02), 369-396.
- Bonilla, N. (2016). *Análisis del Ciclo de Vida del proceso de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico De Costa Rica.
- Centro Nacional de Energías Renovables. (2013). *Tecnología Fotovoltaica de CdTe de First Solar: Evaluación Medioambiental, de Salud y Seguridad*. Santiago de Chile: CENER.
- Congreso de la República de Colombia. (2014). *LEY 1715 DE 2014 "Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional"*. Bogota, Colombia: Republica de Colombia.
- Fiandra, V., Sannino, L., Andreozzi, C., Corcellib, F., & Graditi, G. (2019). Silicon photovoltaic modules at end-of-life: Removal of polymeric layers. *Waste Management. ELSEVIER*, 97-107.
- Gobierno de Colombia. (2018). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: Resumen Ejecutivo*. Bogota .
- Gómez, J., Murcia, J., & Cabeza, I. (2017). *La Energía Solar Fotovoltaica en Colombia: Potenciales, Antecedentes y Perspectivas*. Bogotá, Colombia.: Universidad Santo Tomás, Ingeniería Mecánica.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2016). *Informes Nacional De Generación De Residuos o Desechos Peligrosos*. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, Gobierno Nacional De Colombia.
- International Renewable Energy Agency. (28 de 04 de 2019). *Solar energy .International Renewable Energy Agency*. Obtenido de International Renewable Energy Agency: <https://www.irena.org/solar>
- IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems. (2016). *End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels*. IRENA AND IEA-PVPS.
- Latunussa, C., Ardente, F., Blengini, G. A., & Mancin, M. (November de 2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 156, 101-111.

## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. (2018). *Decreto 284 de 2018 Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos - RAEE Y se dictan otras.* Bogotá, DC. Colombia: Gobierno Nacional de Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. Gobierno Nacional de Colombia. (24 de Febrero de 2019). *HomeAsuntos Ambientales, Sectorial y UrbanaSustancias Químicas y Residuos Peligrosos*. Recuperado el 24 de Febrero de 2019, de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/sustancias-quimicas-y-residuos-peligrosos#informaci%C3%B3n-de-inter%C3%A9s>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. (2005). *Política Ambiental Para La Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos*. Bogotá, DC. Colombia: Gobierno Nacional de Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. (2017). *Política Nacional de Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE*. Bogotá, D.C.: Colombia: Gobierno Nacional de Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007 ). *Gestión Integral de los Residuos o desechos peligrosos bases conceptuales*. Bogotá, D.C., Colombia: Gobierno de Colombia.
- Parvez, M., Candace, L., Nazmut, H., & Shahjadi, H. (5 de Septiembre de 2018). Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment. *Energies*, 11(9), 1-21.
- Parvez, M., Nazmul, H., Shahjadi , H., & Candace, L. (5 de Septiembre de 2018 , 11 (9), 2346). Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment. *Energies*, 11(9), 1-21. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/en11092346>
- Pasqualino, J., Cabrera, C., & Vanegas, M. (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe Colombiano. *Prospect*, 13, 68-75.
- Ramírez, A. (2018). *Análisis y Propuesta Para La Disposición Final De Paneles Solares Fotovoltaicos En Colombia*. Envigado, Colombia: Universidad EIA.
- Tammaro, M., Rimauro, J., Fiandra, V., & Antonio, S. (27 de Marzo de 2015). Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: Experimental



## MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS

assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes. *Renewable Energy. Elsevier*, 103-112.

Valadez, R. E., De La Torre, J., Esparza, D., & Rivas, J. (Septiembre de 2017). Mejoramiento de películas delgadas de CdTe/CdS mediante activación húmeda de CdCl<sub>2</sub> en una atmosfera de aire para aplicaciones en celdas solares. *Revista de Ingeniería Tecnológica*, 1(3), 1-8.

World Health Organization . (1999). *IARC Monographs on the Evaluation of Arcinogenic Risks to Humnas*. Lyon, Francia: IARC.